

บทความวิจัย (Research Article)

## วิธีการจัดอันดับสำหรับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงโดยใช้การประเมินประสิทธิภาพแบบไขว้แบบหลาย วัตถุประสงค์สำหรับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง และ วิธีสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์

นรงค์ วิชาผา<sup>1,\*</sup> และ อัจฉรา ชุมพล

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และระบบอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

\*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: narong.wi@ksu.ac.th

(รับบทความ: 27 ตุลาคม 2566; แก้ไขบทความ: 14 พฤศจิกายน 2566; ตอรับบทความ: 30 พฤศจิกายน 2566)

### บทคัดย่อ

การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล หรือ DEA (Data Envelopment Analysis) แบบดั้งเดิม ถูกใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยการตัดสินใจ (DMUs) ที่มีค่าแน่นอน (Precise Data) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลแบบดั้งเดิมไม่สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิตที่มีค่าไม่แน่นอน (Imprecise Data) ได้ โดยข้อมูลที่ไม่แน่นอนอาจมีรูปแบบ เช่น ข้อมูลช่วง (Interval Data) หรือข้อมูลแบบคลุมเครือ (Fuzzy Data) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับข้อมูลแบบช่วง หรือ MOIDEA (Multi-Objective Interval Data Envelopment Analysis) และวิธีสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ หรือ RCC (Relative Closeness Coefficient) สำหรับการประเมินและจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง ขั้นตอนแรกวิธี MOIDEA จะถูกใช้สำหรับการหาค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงของหน่วยผลิต จากนั้นนำค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงที่ได้มาทำการแปลงค่าจากค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงให้เป็นค่าตัวเลขที่ชัดเจนโดยใช้วิธี RCC ผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอกับปัญหาในวรรณกรรมพบว่าวิธีการที่นำเสนอมีค่าสหสัมพันธ์สเปียร์แมนสูงมาก ( $r = 0.999$ ) ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงมีความน่าเชื่อถือและสามารถเป็นแนวทางหนึ่งในการประเมินและจัดลำดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงได้

**คำสำคัญ:** การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลที่มีข้อมูลแบบช่วง วิธีการประเมินประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับข้อมูลแบบช่วง วิธีสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์

การอ้างอิงบทความ: นรงค์ วิชาผา และ อัจฉรา ชุมพล, "วิธีการจัดอันดับสำหรับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงโดยใช้การประเมินประสิทธิภาพแบบไขว้แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง และ วิธีสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์", วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, vol. 1, no. 6, pp. 28-37, 2566.

บทความวิจัย (Research Article)

## A Ranking Approach for Decision Making Units with Interval Data using Multi-Objective IDEA Model and Relative Closeness Coefficient Method

Narong Wichapa<sup>1,\*</sup> and Atchara Choopol<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

<sup>2</sup> Department of Computer Engineering and Automation, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

\* Corresponding Author: narong.wi@ksu.ac.th

(Received: October 27, 2023; Revised: November 14, 2023; Accepted: November 30, 2023)

### Abstract

The traditional Data Envelopment Analysis (DEA) model can assess the relative efficiency of decision-making units (DMUs) with precise data. However, it cannot be applied to evaluate the efficiency of production units with imprecise data. Imprecise data can take various forms, such as interval data or fuzzy data. This research aims to introduce a ranking method for DMUs with interval data using a Multi-Objective IDEA Model (MOIDEA model) and the Relative Closeness Coefficient method (RCC). In the first step, the MOIDEA model is used to assess interval efficiency. Subsequently, the interval efficiency scores were transformed into precise efficiency scores using the Relative Closeness Coefficient (RCC) method. Testing the proposed method against problem in the literature reveals that it achieves a high Spearman rank correlation ( $r > 0.999$ ) when compared to a method in the literature. Therefore, the proposed method is reliable and can serve as one approach for assessing and ranking DMUs that possess interval data.

**Keywords:** Data Envelopment Analysis, Interval Data Envelopment Analysis, Multi-Objective IDEA Model, Relative Closeness Coefficient Method

Please cite this article as: N. Wichapa and A. Choopol, A Ranking Approach for Decision Making Units with Interval Data using Multi-Objective IDEA Model and Relative Closeness Coefficient Method, "The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University", vol. 1, no. 6, pp. 28-37, 2023

บทความวิจัย (Research Article)

## 1. บทนำ

แม้ว่าวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล หรือ DEA (Data Envelopment Analysis) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมสูงสำหรับนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของหน่วยผลิต หรือ DMUs (Decision Making Units) ที่มีหลายปัจจัย ทั้งปัจจัยนำเข้า (Inputs) และปัจจัยผลผลิต (Outputs) โดยแต่ละปัจจัยมีค่าข้อมูลเป็นตัวเลขที่ชัดเจน (Crisp Value) [1-3] อย่างไรก็ตามหากข้อมูลเป็นแบบช่วง (มีค่าขอบเขตล่างและค่าขอบเขตบน) วิธี DEA ดั้งเดิมไม่สามารถจัดลำดับหน่วยผลิตได้ [4, 5] ด้วยเหตุนี้ Wang et al. [6] ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลแบบช่วง หรือวิธี IDEA (Interval Data Envelopment Analysis) สำหรับการประเมินและจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลเป็นช่วง ซึ่งตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับ IDEA ที่สร้างขึ้นจะมี 2 ตัวแบบ ได้แก่ ตัวแบบ IDEA สำหรับการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ขอบเขตล่าง และ ตัวแบบ IDEA สำหรับการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ขอบเขตบน ซึ่งทั้งสองตัวแบบจะแยกการคำนวณอย่างอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นผลให้ผลเฉลยของชุดน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Weights) ของแต่ละปัจจัยอาจไม่สอดคล้องอย่างสมบูรณ์สำหรับบางปัญหา IDEA หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตบนที่คำนวณได้อาจมีค่าน้อยกว่าค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของเขตล่าง ซึ่งในความเป็นจริงค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตบนควรมีค่ามากกว่าค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของเขตล่างเสมอตามหลักการของตัวเลขแบบช่วง

ดังนั้นการพัฒนาวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบช่วง หรือ IDEA ดั้งเดิมสำหรับการประเมินและจัดอันดับหน่วยผลิตจึงเป็นสิ่งที่ทำหาย นอกจากนี้ผลลัพธ์หรือค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ที่ได้จากประเมินหน่วยผลิตสำหรับปัญหา IDEA จะมีค่าเป็นช่วงคะแนน ซึ่งจะทำให้การจัดอันดับหน่วยผลิตมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นนับเป็นสิ่งทำหายในการพัฒนาเครื่องมือ

สำหรับการจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีผลการประเมินเป็นค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ที่มีค่าคะแนนเป็นแบบช่วง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการจัดอันดับของหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง เริ่มจากการพัฒนาวิธีการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ที่หน่วยผลิตมีข้อมูลแบบช่วงโดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลแบบช่วงหลายวัตถุประสงค์ หรือ MOIDEA (Multi-Objective IDEA model) สำหรับคำนวณหาค่าวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงก่อน จากนั้นจะนำเสนอวิธีสัมประสิทธิ์ ความใกล้เคียงสัมพัทธ์ (Relative Closeness Coefficient: RCC) โดย Wichapa et al. [7, 8] ซึ่งวิธีนี้ได้ถูกพัฒนามาจากแนวคิดของ TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) ของ Hwang and Yoon [9] ซึ่งวิธี RCC ได้ถูกนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพให้สามารถใช้ในการจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงในงานวิจัยนี้

ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำเสนอการพัฒนาวิธีการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ดั้งเดิมให้สามารถแก้ปัญหาหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงได้ ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า MOIDEA รวมถึงยังมีข้อดีอีกประการคือนำเสนอวิธีการ RCC สำหรับจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงได้

## 2. การทบทวนวรรณกรรม

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล หรือ DEA (Data Envelopment Analysis) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Charnes, Cooper and Roberts [10] ซึ่งตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของนี้เรียกว่า CCR ซึ่งตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้ได้ยอมรับว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการวัดคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (Relative Efficiency Score) โดยที่ผ่านมานในอดีตพบว่าตัวแบบ CCR ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยหลากหลายสาขา เช่น

บทความวิจัย (Research Article)

ด้านวิศวกรรมศาสตร์ ด้านเศรษฐศาสตร์ ด้านสิ่งแวดล้อม และด้านอื่น ๆ [11-13]

การวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ด้วยตัวแบบ CCR มีข้อดีคือสามารถวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิตจำนวนมาก โดยที่แต่ละหน่วยผลิตแต่ละหน่วยผลิตมีหลายปัจจัย ทั้งปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิตได้ โดยไม่จำเป็นต้องปรับข้อมูลให้เป็นมาตรฐาน (Normalized Data) ก่อนการคำนวณ และไม่จำเป็นต้องกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยก่อนเพราะตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ CCR สามารถหาผลเฉลยของค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยได้จากการประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ ได้ [14, 15] อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธี CCR จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิตที่มีข้อมูลชัดเจน (Crisp Data) อย่างไรก็ตามวิธี CCR ดังเดิมไม่สามารถแก้ปัญหา IDEA ได้ เนื่องจากหน่วยผลิตแต่ละหน่วยผลิตมีข้อมูลแบบช่วง หรือเป็นแบบผสมระหว่างข้อมูลชัดเจน และข้อมูลแบบช่วง

ดังนั้นเพื่อที่จะเอาชนะข้อบกพร่องนี้ Wang et al. [16] จึงได้นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงและTOPSIS หรือ IDEA based TOPSIS สำหรับแก้ปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามวิธีการของเขาจะประกอบด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตล่าง และตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตบนจะแยกการคำนวณโดยอิสระต่อกัน ซึ่งในบางปัญหาอาจทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ไม่สอดคล้องกับข้อมูลแบบช่วง กล่าวคือค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตบนอาจมีค่าน้อยกว่าค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตล่างสำหรับบางปัญหา ดังนั้นการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ IDEA ให้เป็นตัวแบบ IDEA แบบหลายวัตถุประสงค์จะเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการแก้ไขข้อบกพร่องนี้

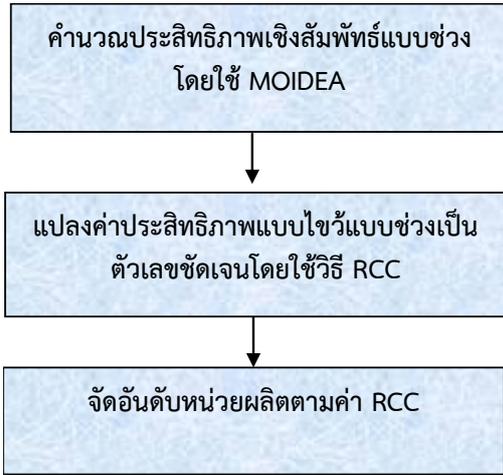
นอกจากนี้สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจากตัวแบบ IDEA จะให้ค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์เป็นแบบช่วง ซึ่งทำให้การการอันดับหน่วยผลิตเป็นสิ่งที่น่าสนใจและมีความท้าทายอย่างยิ่งสำหรับการที่จะพัฒนาวิธีการใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง

นอกจากนี้การพัฒนาวิธีการจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เป็นช่วงโดยอาศัยแนวคิดของ TOPSIS [9] โดยวิธีการที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนค่าคะแนนที่เป็นช่วง (Interval Efficiency Score) ให้เป็นค่าคะแนนที่ชัดเจน (Crisp Efficiency Score) เพื่อจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วง โดยวิธีการนี้เรียกว่าวิธีสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียงสัมพัทธ์ หรือ RCC (Relative Closeness Coefficient) โดยวิธีการดังกล่าวดัดแปลงมาจาก Wichapa et al. [7, 8] ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วง

### 3. วิธีการ

ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอสำหรับการจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะนำเสนอการประเมินประสิทธิภาพไขว้แบบช่วงโดยใช้วิธี MOIDEA จากนั้นแปลงประสิทธิภาพไขว้แบบช่วงโดยใช้วิธี RCC

บทความวิจัย (Research Article)



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณของวิธีการที่นำเสนอ

### 3.1 คำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ MOIDEA

กำหนดให้หน่วยผลิตมีจำนวนทั้งหมด  $n$  หน่วย  $\{DMU_j / j = 1, 2, 3, \dots, n\}$  ซึ่งแต่ละหน่วยผลิต หรือ  $DMU_j$  ใช้ปัจจัยนำเข้าจำนวน  $m$  ปัจจัย เพื่อสร้างปัจจัยผลผลิตจำนวน  $s$  ปัจจัย โดยที่  $y_{rj}$  และ  $x_{ij}$ , แทนปัจจัยผลผลิตและปัจจัยนำเข้าตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สำหรับข้อมูลที่เป็นช่วงสามารถนิยามปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิตแบบช่วงได้ดังนี้  $[x_{ij}^l, x_{ij}^u]$  และ  $[y_{rj}^l, y_{rj}^u]$  ตามลำดับ โดยที่  $x_{ij}^l > 0$  และ  $y_{rj}^l > 0$  โดยอาศัยแนวคิดของวิธี IDEA ดังเดิม [6, 16] มาเป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ MOIDEA สำหรับการประเมินหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง เพื่อคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วง  $[E_{kk}^l, E_{kk}^u]$  ดังตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ (1)

$$\begin{aligned}
 \text{Max} &= E_{kk}^l + E_{kk}^u \\
 &= \sum_{r=1}^s u_{rk}^l \cdot y_{rk}^l + \sum_{r=1}^s u_{rk}^u \cdot y_{rk}^u \\
 \text{s.t.} & \sum_{r=1}^s u_{rk}^l \cdot y_{rk}^u - \sum_{i=1}^m v_{ik}^l \cdot x_{ij}^l \leq 0, \forall j, j = 1, 2, \dots, n \\
 & \sum_{r=1}^s u_{rk}^u \cdot y_{rk}^u - \sum_{i=1}^m v_{ik}^u \cdot x_{ij}^l \leq 0, \forall j, j = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^m v_{ik}^l \cdot x_{ik}^u &= 1, \forall k, \quad k = 1, 2, \dots, n \\
 \sum_{i=1}^m v_{ik}^u \cdot x_{ik}^l &= 1, \forall k, \quad k = 1, 2, \dots, n \\
 v_{ik}^u &\geq v_{ik}^l, u_{rk}^u \geq u_{rk}^l, \forall i, \forall r, \forall k \\
 v_{ik}^l, u_{rk}^l, v_{ik}^u, u_{rk}^u &\geq 0, \forall i, \forall r, \forall k
 \end{aligned}$$

ในสมการที่ (1) เป็นสมการเป้าหมายค่าประสิทธิภาพแบบไขว้มากที่สุด ซึ่งแต่ละ  $DMU_k$  เป็นหน่วยผลิตที่กำลังถูกประเมิน กำหนดให้  $v_{ik}$  และ  $u_{rk}$  เป็นน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยนำเข้า  $i$  และปัจจัยผลผลิต  $r$  ตามลำดับ โดยกำหนดให้  $E_{kk}^l$  และ  $E_{kk}^u$  เป็นค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตล่าง และค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตบนของหน่วยผลิต  $DMU_k$  ตามลำดับ

### 3.2 แปลงค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงเป็นตัวเลขชัดเจนโดยใช้วิธี RCC

เนื่องจากค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ที่ได้จะมีค่าเป็นแบบช่วง การจัดเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตจึงจำเป็นต้องพัฒนาแนวคิดในการแปลงค่าแบบช่วง (Interval Value) มาเป็นตัวเลขที่ชัดเจน (Crisp Value) โดยในงานวิจัยนี้จะอาศัยแนวคิดของ TOPSIS มาปรับปรุงเป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ (RCC) ดังสมการที่ (2) ถึงสมการที่ (4)

กำหนดให้  $E^n$  เป็นค่าอุดมคติเชิงลบ และ  $E^p$  เป็นค่าอุดมคติเชิงบวก ซึ่งหาค่าดังสมการที่ (2) และสมการที่ (3) ตามลำดับ

$$E^n = \min \{E_{kk}^l, E_{kk}^u\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$E^p = \max \{E_{kk}^l, E_{kk}^u\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

โดยที่ค่าคะแนน  $E_{kk}^l$  และค่าคะแนน  $E_{kk}^u$  เป็นค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของขอบเขตล่างและ

บทความวิจัย (Research Article)

ขอบเขตบนตามลำดับ ซึ่งได้มาจากการคำนวณตัวแบบ MOIDEA ในตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ (1)

จากนั้นคำนวณค่าระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงลบ ( $D^-$ ) และค่าระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวก ( $D^+$ ) ดังสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ตามลำดับ

$$D_k^- = (E_k^l - E^*) + (E_k^u - E^*), k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$D_k^+ = (E^* - E_k^l) + (E^* - E_k^u), k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5) สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ หรือ RCC (Relative Closeness Coefficient) ได้ ดังสมการที่ (6)

$$RCC_k = (D_k^-) / (D_k^- + D_k^+), k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

ถ้าหน่วยผลิตใดมีค่า RCC สูงกว่าจะหมายถึงหน่วยผลิตนั้นมีอันดับที่ดีกว่า

#### 4. ผลการวิจัย

วิธีการที่นำเสนอสำหรับการจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงในปัญหา IDEA ในงานวิจัยนี้จะถูกทดสอบกับปัญหา Primary School ซึ่งนำเสนอในงานวิจัยของ Wang et al. [16] กำหนดให้โรงเรียนเป็นหน่วยผลิต (DMUs) จากนั้นกำหนดค่าปัจจัยนำเข้า  $x_1, x_2, x_3, x_4$  และ  $x_5$  หมายถึงจำนวนเจ้าหน้าที่ (Number of Staff) พื้นที่โรงเรียน (School Building Area) สำเนาหนังสือ (Copies of Books) ต้นทุนค่าซ่อม (Fixed Asset) มีหน่วยเป็น Million RMB งบประมาณของโรงเรียน (School Budget) และปัจจัยผลผลิต  $y_1$  หมายถึงจำนวนนักเรียน (Number of Students) ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลปัจจัยนำเข้า ปัจจัยผลผลิต และหน่วยผลิต สำหรับใช้เป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการคำนวณประสิทธิภาพแบบช่วงและจัดอันดับหน่วยผลิต ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัญหา Primary School

| DMUs | $x_1$     | $x_2$  | $x_3$  | $x_4$ | $x_5$ | $y_1$       |
|------|-----------|--------|--------|-------|-------|-------------|
| 1    | [47,53]   | 3964   | 8947   | 3.54  | 9.26  | [313,360]   |
| 2    | [39,40]   | 965    | 4247   | 2.04  | 3.41  | [102,110]   |
| 3    | [65,70]   | 2222   | 8543   | 2.23  | 12.07 | [263,300]   |
| 4    | [43,54]   | 2316   | 7560   | 2.42  | 5.7   | [261,274]   |
| 5    | [47,49]   | 3362   | 11,035 | 1.23  | 5.9   | [292,312]   |
| 6    | [49,59]   | 3273   | 6120   | 5.61  | 8.53  | [261,289]   |
| 7    | [30,36]   | 1534   | 7439   | 2.55  | 5.73  | [256,270]   |
| 8    | [45,57]   | 1130   | 4043   | 2.25  | 10.07 | [73,81]     |
| 9    | [38,45]   | 2278   | 7306   | 1.51  | 7.6   | [293,311]   |
| 10   | [104,124] | 7321   | 25,218 | 16.91 | 15.73 | [1129,1195] |
| 11   | [92,110]  | 6218   | 11,552 | 10.86 | 13.95 | [410,455]   |
| 12   | [38,40]   | 1878   | 4155   | 3.89  | 6.43  | [191,202]   |
| 13   | [42,46]   | 2649   | 6986   | 1.41  | 6.22  | [242,263]   |
| 14   | [39,50]   | 2402   | 8623   | 2.18  | 7.25  | [264,341]   |
| 15   | [55,57]   | 2359   | 7200   | 5.06  | 8.57  | [221,264]   |
| 16   | [30,39]   | 1328   | 6260   | 1.87  | 5.68  | [179,227]   |
| 17   | [132,137] | 11,922 | 53,840 | 8.28  | 20.07 | [2672,3122] |
| 18   | [59,62]   | 3552   | 11,674 | 6.76  | 8.2   | [417,505]   |
| 19   | [17,19]   | 1666   | 3926   | 2.98  | 2.83  | [125,147]   |
| 20   | [173,180] | 23,200 | 40,000 | 23.09 | 25.18 | [3066,3122] |
| 21   | [73,74]   | 3271   | 21,484 | 2.34  | 10.9  | [360,386]   |
| 22   | [59,72]   | 4301   | 10,300 | 2.26  | 10.14 | [290,363]   |
| 23   | [99,112]  | 21,175 | 47,060 | 7.34  | 14.35 | [1995,2317] |
| 24   | [35,41]   | 1410   | 13,803 | 1.65  | 5.37  | [212,230]   |
| 25   | [65,105]  | 30,705 | 22,000 | 38.3  | 15.99 | [1252,1276] |

#### 4.1 ผลการคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ MOIDEA

จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ MOIDEA ดังแสดงในตัวอย่างทางคณิตศาสตร์ (1) สามารถนำมาเขียนโค้ดโดยใช้ซอฟต์แวร์ Lingo ดังแสดงในภาพที่ 2

```

MODEL:
SETS:
DMU/1..25/: ;
FACTOR/1..6/;;
DXF( DMU, FACTOR):
DMUK/1..25/:ACE_L,ACE_U,CCR_L,CCR_U,SCORE,I
DEACCRL,IDEACCRU;
IK(DMU,DMUK):INPUT_L,INPUT_U,OUTPUT_L,OUTPU
T_U,CE_L,CE_U;
KJ( DMUK, FACTOR): XL,XU,WL,WU ;
ENDSETS
DATA:

```

นรงค์ วิชาภา และ อัจฉรา ชุมพล, วิธีการจัดอันดับสำหรับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงโดยใช้การประเมินประสิทธิภาพแบบไขว้แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง และ วิธีสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์

บทความวิจัย (Research Article)

```

NINPUTS, XL, XU =
@OLE('C:\Users\naron\OneDrive\Paper_EN
journal\Paper1\PrimarySchoolsGameMO.xlsx', '
NINPUTS', 'XL', 'XU');
ENDDATA
MAX = @SUM( DMUK ( K) : SCORE ( K) );
@FOR( DMUK ( K) :@FOR( DMU (
I) :SCORE ( K) =CCR_L ( K) !+ EM ( K) ; + CCR_U (
K) ));
@FOR( DMUK ( K) :@FOR( DMU (
I) :CCR_L ( K) = @SUM ( FACTOR ( J) | J #GT#
NINPUTS:XL ( K, J) * WL ( K, J) ));
@FOR( DMUK ( K) :@FOR( DMU (
I) :CCR_U ( K) = @SUM ( FACTOR ( J) | J #GT#
NINPUTS:XU ( K, J) * WU ( K, J) ));
@FOR( DMU ( I) :@FOR(
DMU ( K) :@SUM ( FACTOR ( J) | J #GT# NINPUTS:
XU ( I, J) * WL ( K, J) ) <=
@SUM ( FACTOR ( J) | J #LE#
NINPUTS: XL ( I, J) * WL ( K, J) ));
@FOR( DMU ( I) :@FOR(
DMU ( K) :@SUM ( FACTOR ( J) | J #GT# NINPUTS:
XU ( I, J) * WU ( K, J) ) <=
@SUM ( FACTOR ( J) | J #LE#
NINPUTS: XL ( I, J) * WU ( K, J) ));
@FOR( DMUK ( K) :@FOR(
DMU ( I) :@SUM ( FACTOR ( J) | J #LE#
NINPUTS:XU ( K, J) * WL ( K, J) = 1));
@FOR( DMUK ( K) :@FOR(
DMU ( I) :@SUM ( FACTOR ( J) | J #LE#
NINPUTS:XL ( K, J) * WU ( K, J) = 1));
@FOR( DMUK ( K) :@FOR(
FACTOR ( J) | J #GT# NINPUTS: WL ( K, J) <=WU ( K,
J) ));
@FOR( DMUK ( K) :@FOR(
FACTOR ( J) | J #LE# NINPUTS: WL ( K, J) <=WU ( K,
J) ));
@FOR( DXF ( I, J) :
WL ( I, J) >=0);
@FOR( DXF ( I, J) :
WU ( I, J) >=0);
@FOR( DXF ( I, J) :
WU ( I, J) >=WL ( I, J) );
@FOR( DMUK ( K) :@FOR( DMU (
I) :CCR_L ( K) <=CCR_U ( K) ));
@FOR( DMUK ( K) :@FOR( DMU (
I) :CCR_U ( K) <= 1));
END

```

ภาพที่ 2 โค้ดของ Lingo สำหรับตัวแบบ MOIDEA

จากนั้นนำเข้าข้อมูลจากตารางที่ 1 เข้าในโค้ด Lingo ที่เขียนขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2 จากนั้นทำการประมวลผลเพื่อหาค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงของแต่ละหน่วยผลิต โดยรายละเอียดผลการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 2

4.2 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียงสัมพัทธ์แบบช่วงของแต่ละหน่วยผลิต

จากผลเฉลยค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นใช้สมการที่ (2) และสมการที่ (3) กำหนดค่าอุดมคติเชิงลบ ( $E^-$ ) และค่าอุดมคติเชิงบวก ( $E^+$ ) จากนั้นคำนวณค่าระยะทางที่ห่างจากค่าอุดมคติเชิงลบ ( $D_k^-$ ) และระยะทางที่ห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวก ( $D_k^+$ ) โดยใช้สมการที่ (4) และสมการที่ (5) ตามลำดับ สุดท้ายคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียงสัมพัทธ์หรือค่า RCC โดยใช้สมการที่ (6) รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียงสัมพัทธ์และค่าอันดับของแต่ละหน่วยผลิตโดยใช้วิธี RCC

| DMUs                            | $[E_k^-, E_k^+]$ | $D_k^-$ | $D_k^+$ | RCC <sub>k</sub> | Rank |
|---------------------------------|------------------|---------|---------|------------------|------|
| 1                               | [0.5038,0.5794]  | 0.4934  | 0.9169  | 0.3499           | 18   |
| 2                               | [0.4119,0.4442]  | 0.2663  | 1.1439  | 0.1889           | 24   |
| 3                               | [0.5118,0.5838]  | 0.5059  | 0.9044  | 0.3587           | 17   |
| 4                               | [0.5503,0.5777]  | 0.5383  | 0.8720  | 0.3817           | 16   |
| 5                               | [0.6296,0.6727]  | 0.7126  | 0.6976  | 0.5053           | 9    |
| 6                               | [0.5647,0.6253]  | 0.6003  | 0.8100  | 0.4256           | 13   |
| 7                               | [0.6373,0.6721]  | 0.7197  | 0.6906  | 0.5103           | 8    |
| 8                               | [0.2949,0.3272]  | 0.0323  | 1.3780  | 0.0229           | 25   |
| 9                               | [0.6630,0.7037]  | 0.7769  | 0.6334  | 0.5509           | 6    |
| 10                              | [0.7240,0.7663]  | 0.9005  | 0.5098  | 0.6385           | 5    |
| 11                              | [0.4688,0.5202]  | 0.3992  | 1.0110  | 0.2831           | 22   |
| 12                              | [0.6485,0.6858]  | 0.7446  | 0.6657  | 0.5280           | 7    |
| 13                              | [0.5748,0.6247]  | 0.6098  | 0.8005  | 0.4324           | 11   |
| 14                              | [0.5004,0.6463]  | 0.5570  | 0.8533  | 0.3950           | 15   |
| 15                              | [0.4801,0.5736]  | 0.4640  | 0.9463  | 0.3290           | 19   |
| 16                              | [0.5147,0.6527]  | 0.5777  | 0.8325  | 0.4097           | 14   |
| 17                              | [0.8559,1.0000]  | 1.2661  | 0.1441  | 0.8978           | 3    |
| 18                              | [0.5704,0.6908]  | 0.6715  | 0.7388  | 0.4761           | 10   |
| 19                              | [0.4592,0.5400]  | 0.4094  | 1.0009  | 0.2903           | 21   |
| 20                              | [0.9821,1.0000]  | 1.3923  | 0.0179  | 0.9873           | 1    |
| 21                              | [0.4203,0.4506]  | 0.2812  | 1.1291  | 0.1994           | 23   |
| 22                              | [0.4608,0.5768]  | 0.4480  | 0.9623  | 0.3176           | 20   |
| 23                              | [0.8610,1.0000]  | 1.2713  | 0.1390  | 0.9015           | 2    |
| 24                              | [0.5742,0.6229]  | 0.6073  | 0.8029  | 0.4307           | 12   |
| 25                              | [0.6950,0.9152]  | 1.0205  | 0.3898  | 0.7236           | 4    |
| $[E^-, E^+] = [0.2949, 1.0000]$ |                  |         |         |                  |      |

นรงค์ วิชาภา และ อัจฉรา ชุมพล, วิธีการจัดอันดับสำหรับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงโดยใช้การประเมินประสิทธิภาพแบบไขว้แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง และ วิธีสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียงสัมพัทธ์

บทความวิจัย (Research Article)

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาแต่ละหน่วยผลิตพบว่าค่า RCC ของหน่วยผลิตที่ 20 มีค่ามากที่สุด (RCC=0.9873) ดังนั้นจึงถูกจัดไว้ในอันดับที่ 1 ในขณะที่หน่วยผลิตที่ 8 มีค่า RCC น้อยสุด (RCC=0.0229) จึงถูกจัดไว้ในอันดับที่ 25

จากนั้นวิธีการที่นำเสนอจะถูกเปรียบเทียบกับวิธีการของ Wang et al. [16] ดังตารางที่ 3 ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบการจัดอันดับของวิธีที่นำเสนอกับวิธีของ Wang

| DMUs | Distance [วิธีของ Wang] | Rank | RCC <sub>k</sub> (วิธีที่นำเสนอ) | Rank |
|------|-------------------------|------|----------------------------------|------|
| 1    | 0.3445                  | 18   | 0.3499                           | 18   |
| 2    | 0.5383                  | 24   | 0.1889                           | 24   |
| 3    | 0.3348                  | 17   | 0.3587                           | 17   |
| 4    | 0.3097                  | 16   | 0.3817                           | 16   |
| 5    | 0.2000                  | 9    | 0.5053                           | 9    |
| 6    | 0.2671                  | 12   | 0.4256                           | 13   |
| 7    | 0.1926                  | 8    | 0.5103                           | 8    |
| 8    | 0.7852                  | 25   | 0.0229                           | 25   |
| 9    | 0.1612                  | 6    | 0.5509                           | 6    |
| 10   | 0.1030                  | 5    | 0.6385                           | 5    |
| 11   | 0.4191                  | 22   | 0.2831                           | 22   |
| 12   | 0.1783                  | 7    | 0.5280                           | 7    |
| 13   | 0.2610                  | 11   | 0.4324                           | 11   |
| 14   | 0.3031                  | 15   | 0.3950                           | 15   |
| 15   | 0.3683                  | 19   | 0.3290                           | 19   |
| 16   | 0.2880                  | 14   | 0.4097                           | 14   |
| 17   | 0.0135                  | 3    | 0.8978                           | 3    |
| 18   | 0.2250                  | 10   | 0.4761                           | 10   |
| 19   | 0.4118                  | 21   | 0.2903                           | 21   |
| 20   | 0.0000                  | 1    | 0.9873                           | 1    |
| 21   | 0.5298                  | 23   | 0.1994                           | 23   |
| 22   | 0.3839                  | 20   | 0.3176                           | 20   |
| 23   | 0.0125                  | 2    | 0.9015                           | 2    |
| 24   | 0.2681                  | 13   | 0.4307                           | 12   |
| 25   | 0.1009                  | 4    | 0.7236                           | 4    |

จากตารางที่ 3 นำข้อมูลการจัดอันดับหน่วยผลิตไปทดสอบสหสัมพันธ์สเปียร์แมนระหว่างวิธีที่นำเสนอและวิธี IDEA based TOPSIS ของ Wang et al. [16] ผลการทดสอบพบว่าวิธีทั้งสองมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ

0.999 ( $r_s=0.999$ ) ซึ่งแสดงว่าวิธีที่นำเสนอสอดคล้องกับวิธีการของ Wang et al. [16] สูงมาก ดังนั้นวิธีที่นำเสนอจึงเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินและจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงในกรณีอื่นได้

### 5. สรุปผล

การวิเคราะห์ข้อมูลแบบล้อมกรอบ หรือ DEA (Data Envelopment Analysis) เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่ได้รับความนิยมสำหรับการประเมินประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิต หรือ DMUs (Decision Making Units) ที่มีข้อมูลแบบชัดเจน ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ DEA มีโครงสร้างที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพในการประเมินประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิตที่มีจำนวนมากได้ ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ DEA ดังเดิม ถูกใช้สำหรับการประเมินหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง อย่างไรก็ตามโลกในความเป็นจริงการได้มาซึ่งข้อมูลที่ชัดเจนเป็นสิ่งที่ยาก ซึ่งโดยทั่วไปข้อมูลจะถูกวัดมาเป็นตัวเลขที่ไม่แน่นอน เช่น ข้อมูลแบบช่วง หรือข้อมูลแบบคลุมเครือ ดังนั้นการพัฒนาวิธีการใหม่สำหรับการประเมินและจัดอันดับหน่วยผลิตจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบหลายวัตถุประสงค์ สำหรับข้อมูลแบบช่วง หรือ MOIDEA (Multi-objective Interval Data Envelopment Analysis) และวิธีสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียงสัมพัทธ์ หรือ RCC (Relative Closeness Coefficient) สำหรับการประเมินและจัดอันดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง โดยในขั้นตอนแรกวิธี MOIDEA จะถูกใช้สำหรับการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงของหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วง จากนั้นนำค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์แบบช่วงที่ได้มาทำการแปลงค่าให้เป็นค่าตัวเลขที่ชัดเจนโดยใช้วิธี RCC ถ้าค่า RCC ของหน่วยผลิตใดสูงกว่าจะหมายถึงหน่วยผลิตนั้นมีอันดับที่สูงกว่า จากผลการทดสอบกับปัญหาหนึ่งใน

#### บทความวิจัย (Research Article)

วรรณกรรมพบว่าวิธีการที่นำเสนอค่าสหสัมพันธ์สเปียร์แมนสูงมาก ( $r = 0.999$ ) เมื่อเทียบวิธี IDEA based TOPSIS [16] ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินและจัดลำดับหน่วยผลิตที่มีข้อมูลแบบช่วงได้

สำหรับข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตคือวิธีการที่นำเสนอควรถูกทดสอบกับปัญหา IDEA อื่น ๆ เพิ่มเติม โดยเฉพาะนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาจริงหรือกรณีศึกษาอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นให้มากขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยเชื่อว่าวิธีการ RCC สามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ หรือปัญหา MCDM ได้

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์สำหรับการสนับสนุนบทความวิจัยนี้ และผู้แต่งขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของบทความวิจัยนี้ให้ดียิ่งขึ้น

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Fan, B. Bai, Q. Qiao, P. Kang, Y. Zhang, and J. Guo, "Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis," *Journal of Environmental Management*, vol. 192, pp. 107-115, 2017/05/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.048>.
- [2] A. Panwar, M. Olfati, M. Pant, and V. Snasel, "A Review on the 40 Years of Existence of Data Envelopment Analysis Models: Historic Development and Current Trends," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 7, pp. 5397-5426, 2022/11/01 2022, doi: [10.1007/s11831-022-09770-3](https://doi.org/10.1007/s11831-022-09770-3).
- [3] K. Fotova Čiković, I. Martinčević, and J. Lozić, "Application of Data Envelopment Analysis (DEA) in the Selection of Sustainable Suppliers: A Review and Bibliometric Analysis," *Sustainability*, vol. 14, no. 11, p. 6672, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6672>.
- [4] A. H. Tajik Yabr, S. E. Najafi, Z. Moghaddas, and P. Shahnazari Shahrezaei, "Interval Cross Efficiency Measurement for General Two-Stage Systems," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, p. 5431358, 2022/02/28 2022, doi: [10.1155/2022/5431358](https://doi.org/10.1155/2022/5431358).
- [5] M. Toloo, E. K. Mensah, and M. Salahi, "Robust optimization and its duality in data envelopment analysis," *Omega*, vol. 108, p. 102583, 2022/04/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2021.102583>.
- [6] Y.-M. Wang, R. Greatbanks, and J.-B. Yang, "Interval efficiency assessment using data envelopment analysis," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 153, no. 3, pp. 347-370, 2005/08/01/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2004.12.011>.
- [7] N. Wichapa, A. Lawong, and M. Donmuen, "Ranking DMUs using a novel combination method for integrating the results of relative closeness benevolent and relative closeness aggressive models," *International Journal of Data and*

บทความวิจัย (Research Article)

- Network Science*, vol. 5, no. 3, pp. 401-416, 2021.
- [8] N. Wichapa and S. Sodsoon, "A Relative Closeness Coefficient Model Based on the Distance of Virtual DMUs Cross-Efficiency Method for Ranking Thai Economic Development," *Engineering Letters*, vol. 31, no. 1, 2023.
- [9] C. Hwang and K. Yoon, "Methods for multiple attribute decision making. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey," *Mult. Attrib. Decis. Mak.*, vol. 1, pp. 58-191, 1981.
- [10] A. Charnes, W. W. Cooper, and E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units," *European Journal of Operational Research*, vol. 2, no. 6, pp. 429-444, 1978/11/01/ 1978, doi: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8).
- [11] A. Fazlollahi and U. Franke, "Measuring the impact of enterprise integration on firm performance using data envelopment analysis," *International Journal of Production Economics*, vol. 200, pp. 119-129, 2018.
- [12] J. Sun, J. Wu, and D. Guo, "Performance ranking of units considering ideal and anti-ideal DMU with common weights," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 9, pp. 6301-6310, 2013.
- [13] F. Hosseinzadeh Lotfi, T. Allahviranloo, M. Shafiee, and H. Saleh, "Data Envelopment Analysis," in *Supply Chain Performance Evaluation: Application of Data Envelopment Analysis*: Springer, 2023, pp. 179-241.
- [14] C.-N. Wang, X.-T. Nguyen, and Y.-H. Wang, "Automobile industry strategic alliance partner selection: The application of a hybrid DEA and grey theory model," *Sustainability*, vol. 8, no. 2, p. 173, 2016.
- [15] P. Peykani, E. Mohammadi, R. F. Saen, S. J. Sadjadi, and M. Rostamy-Malkhalifeh, "Data envelopment analysis and robust optimization: A review," *Expert Systems*, vol. 37, no. 4, p. e12534, 2020, doi: <https://doi.org/10.1111/exsy.12534>.
- [16] L. Wang, L. Li, and N. Hong, "Entropy Cross-Efficiency Model for Decision Making Units with Interval Data," *Entropy*, vol. 18, no. 10, p. 358, 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1099-4300/18/10/358>.